УДК 621.313

АНАЛИЗ КОММУТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА КОММУТАЦИИ

С.И. Качин, Ю.С. Боровиков, О.С. Качин, В.Ю. Саблуков, Е.Н. Клыжко

Томский политехнический университет
E-mail: borovikov@tpu.ru

Рассмотрены свойства обмоток якорей, влияющие на характер коммутационного процесса на завершающем этапе, приведены аналитические зависимости для расчета основных показателей коммутационной напряженности коллекторных электрических машин. Показано, что полученные выражения позволяют достаточно точно прогнозировать эффективность процесса демпфирования коммутируемых секций на стадии возникновения искровых разрядов под щеткой и осуществлять подбор параметров обмоток якоря, обеспечивающих повышение их коммутирующих свойств.

Процесс демпфирования в коммутируемых секциях электрической машины определяется величинами коммутирующих ЭДС первой и последующей в порядке коммутации секций ($e_{к1}$ и $e_{к2}$) и их соотношением (ранее $e_{к1}$ и $e_{к2}$ принимались пропорциональными числам витков в секциях), а также значениями напряжения горения дуги ($U_д$), которое в машинах с медным коллектором может варьироваться в среднем от 10 до 25 В.

Расчеты показывают, что время горения дуги ($t_д$) с увеличением $U_д$ под сбегающим краем щетки на завершающем этапе коммутации снижается (рис. 1). При этом коэффициент демпфирования (G) может возрастать (рис. 2) при определенных значениях коэффициента щеточного перекрытия ($\beta_щ$). При меньших величинах $\beta_щ$ может наблюдаться обратное явление.

Например, при $\beta_щ$=1,2 коэффициент демпфирования в аналогичных условиях снижается с 0,229 до 0,208.

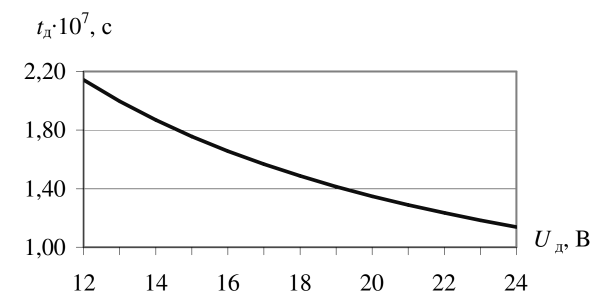


Рис. 1. *Зависимость времени горения дуги от напряжения горения дуги на нижней границе ОБР*

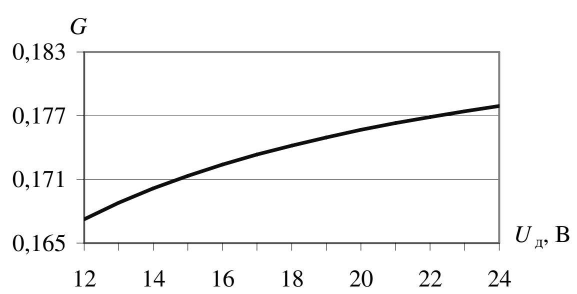


Рис. 2. *Зависимость коэффициента демпфирования от напряжения горения дуги при $\beta_щ$=1,8 на нижней границе ОБР*

Это подтверждает тот факт, что варьируемые параметры следует выбирать исходя из конкретных базовых расчетных данных с учетом всего многообразия существующих между параметрами взаимосвязей.

Данное положение подтверждают расчетные зависимости, полученные на верхней границе области безыскровой работы (ОБР), которые в ряде случаев отличны от аналогичных зависимостей на нижней границе ОБР.

Так, увеличение $\beta_щ$ на верхней границе ОБР приводит к повышению коэффициента демпфирования (рис. 3, *а*) и снижению на нижней границе, рис. 3, *б*. Время горения дуги на верхней границе ОБР возрастает при одинаковой величине тока разрыва (рис. 4, *а*) в сравнении с $t_д$ на нижней границе ОБР (рис. 4, *б*). В результате количество энергии, выделившейся в скользящем контакте (СК), также увеличивается, что сопровождается повышением коэффициента демпфирования (рис. 5, *а*). Здесь при $k_1 \cdot k_2$=0 (k_1=M_{12}/L_1; k_2=M_{12}/L_2, где L_1, L_2 – индуктивности коммутируемых секций 1, 2; M_{12} – взаимная индуктивность между секциями 1, 2;) коэффициент демпфирования равен 1,23, а при $k_1 \cdot k_2$=0,8 составляет 0,339, что выше показателя G на нижней границе ОБР в аналогичных условиях (рис. 5, *б*).

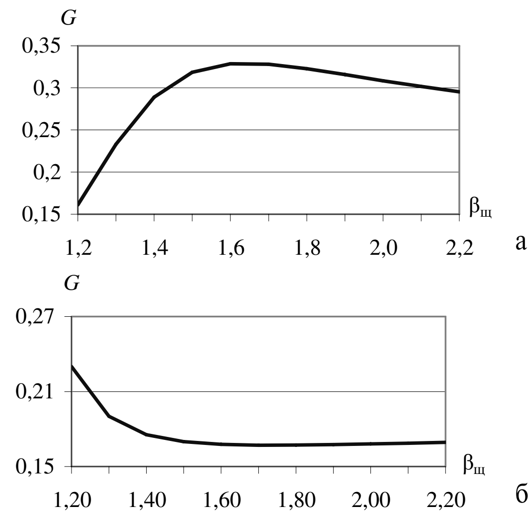


Рис. 3. *Зависимость коэффициента демпфирования от коэффициента щеточного перекрытия на границе ОБР: а) верхней; б) нижней*

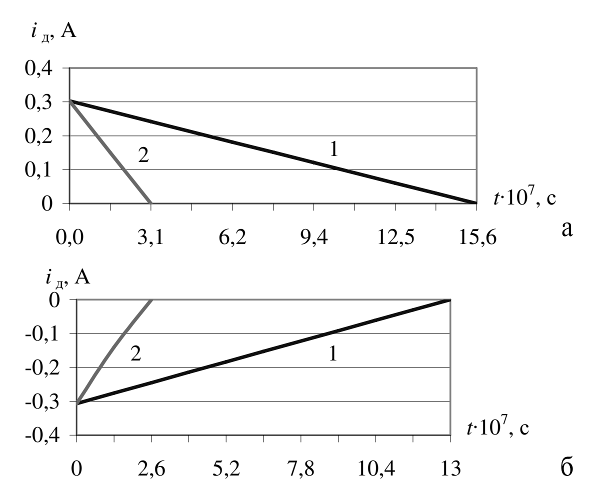


Рис. 4. *Зависимость тока разрыва от времени горения дуги на границе ОБР при $k_1 \cdot k_2=0$ (кривая 1) и $k_1 \cdot k_2=0,8$ (кривая 2): а) верхней; б) нижней*

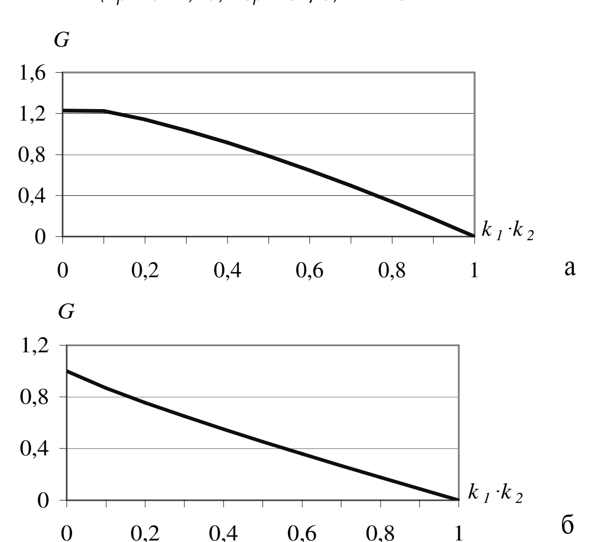


Рис. 5. *Зависимость коэффициента демпфирования от $k_1 \cdot k_2$ на границе ОБР: а) верхней; б) нижней*

Это объясняется тем, что коммутирующая ЭДС $e_{к1}$ при недокоммутации действует согласно с напряжением $U_д$ и способствует снижению тока в сбегающем крае щетки до нуля, а при перекоммутации $e_{к1}$ действует против $U_д$. Наряду с явлениями обмена энергией между коммутируемыми секциями в течение начального периода коммутации, рассмотренными в [1, 2], на коммутационный процесс большое влияние оказывают процессы демпфирования на завершающей стадии коммутации, поскольку они связаны с дугообразованием под щетками и скоротечны, что многократно усиливает обмен энергией между секциями якоря [3].

Вместе с тем процессы взаимного демпфирования коммутируемых секций при возникновении искровых разрядов под щеткой до настоящего времени изучены недостаточно глубоко. Поэтому можно предполагать, что именно в этой области скрыты основные резервы по дальнейшему улучшению коммутирующих свойств обмоток якорей коллекторных электрических машин.

Наиболее полно и всесторонне изучены эффекты демпфирования на завершающей стадии процесса коммутации в работе [1]. Однако при описании процесса демпфирования автором указанной выше работы делались не всегда обоснованные допущения, которые существенно упрощали получение конечных выражений и одновременно исключали из рассмотрения влияние многих факторов на указанный процесс.

Так, например, в исходных уравнениях не учитывались активные сопротивления СК, коммутирующие ЭДС соответствующих секций, величины тока параллельной ветви и тока демпфирующей секции. В результате были получены выражения, позволяющие выявить лишь основные закономерности процесса демпфирования для различных типов якорных обмоток.

Более глубокий анализ изучаемого явления с использованием указанных выражений невозможен, что ограничивает набор параметров, с помощью которых может быть усилен эффект демпфирования.

Следует отметить, что описанные выше исследования проводились без учета характера коммутации в момент появления дугового разряда (недокоммутация или перекоммутация), от чего также зависит протекание процесса демпфирования.

Тем не менее, даже упрощенное изучение процесса демпфирования подтвердило его высокую эффективность в плане снижения энергии, выделяемой в скользящем контакте на завершающей стадии процесса коммутации. Причем данный эффект тем больше, чем больше взаимная магнитная связь (M_{12}) между коммутируемыми секциями.

Поэтому следует более детально изучить рассмотренное явление демпфирования с минимальными допущениями в ходе решения системы дифференциальных уравнений, описывающих данный феномен.

Система дифференциальных уравнений для завершающего этапа коммутации записывается в виде:

$$\begin{cases} L_1 \dfrac{di_1}{dt} + M_{12}\dfrac{di_2}{dt} + i_1[R_{s1} + r_{н1}(t)] = i_2 r_{н1}(t) \pm U_д - e_{к1}; \\ L_2 \dfrac{di_2}{dt} + M_{12}\dfrac{di_1}{dt} + i_2[R_{s2} + r_{н1}(t) + r_{н2}(t)] = \\ \quad = i_a r_{н2}(t) + i_1 r_{н1}(t) - e_{к2}, \end{cases}$$

где R_{s1}, R_{s2} – активные сопротивления секций 1, 2; i_1, i_2 – токи секций 1, 2; $r_{н1}(t)$, $r_{н2}(t)$ – контактные сопротивления под набегающими краями щетки для секций 1, 2; i_a – ток параллельной ветви; $e_{к1}$, $e_{к2}$ – коммутирующие ЭДС секций 1, 2; $U_д$ – напряжение горения дуги под сбегающим краем щетки на завершающей стадии коммутации секции 1 (знак зависит от направления тока в сбегающем крае щетки).

Поскольку длительность искрового разряда под щеткой, как правило, мала в сравнении с расчетным периодом коммутации секции, то может быть

принято допущение о постоянстве контактных сопротивлений $r_{н1}(t)$, $r_{н2}(t)$, а также составляющей $i_2 \cdot \{r_{н1}(t)+k_2[R_{s2}+r_{н1}(t)+r_{н2}(t)]\}$ на протяжении времени горения дуги.

При этом ток секции, завершающей коммутацию с искрением, описывается уравнением

$$i_{д1} = D/C - (i_a + i_{р1} + D/C)e^{-\frac{CL_2}{(L_1L_2 - M_{12}^2)}t},$$

где $i_{р1}$ – ток разрыва секции 1 по окончании расчетного периода коммутации;

$$D = i_{2(0)}[k_2R_{s2} + k_2r_{н2(0)} + r_{н1(0)}(1+k_2)] -$$
$$-k_2i_ar_{н2(0)} \pm U_д - e_{к1} + k_2e_{к2};$$
$$C = R_{s1} + r_{н1(0)}(1+k_2);$$

$r_{н1(0)}$, $r_{н2(0)}$ – сопротивления под набегающим краем щетки для секций 1, 2 в начале искрового разряда; $i_{2(0)}$ – ток секции 2 в момент начала искрового разряда.

Времени начала искрового разряда в секции 1 соответствует свое расчетное время коммутации секции 2:

$$t_{2(0)} = (b_щ - \delta_{из} - t_к)T_к/(b_щ - \delta_{из}),$$

где $b_щ$ – ширина щетки; $t_к$ – коллекторное деление; $T_к$ – период коммутации; $\delta_{из}$ – толщина межламельной изоляции.

Тогда величина электрической энергии, выделенной секцией 1 под сбегающим краем щетки в процессе горения дуги, определяется выражением

$$W_{д2} = \pm U_д(i_a + i_{р1} + D/C)\frac{(L_1L_2 - M_{12}^2)}{CL_2}\times$$
$$\times\left(1 - e^{-\frac{CL_2}{(L_1L_2 - M_{12}^2)}t}\right) \pm U_д(i_a + D/C)t.$$

Максимальное количество энергии выделяется за время горения дуги, рассчитываемое по уравнению

$$t_д = \frac{(M_{12}^2 - L_1L_2)}{CL_2}\ln\left(\frac{i_a + D/C}{i_a + i_{р1} + D/C}\right).$$

При этом коэффициент демпфирования, определяющий долю электрической энергии коммутируемой секции, выделяемой в СК, в сравнении с ее энергией в конце расчетного периода коммутации (в начале искрового разряда), будет равен

$$G = \pm U_д(i_a + i_{р1} + D/C)\frac{2(L_1L_2 - M_{12}^2)}{CL_1L_2i_{р1}^2}\times$$
$$\times\left(1 - e^{-\frac{CL_2}{(L_1L_2 - M_{12}^2)}t_д}\right) \pm U_д(i_a + D/C)\frac{2t_д}{L_1i_{р1}^2}.$$

Полученные выражения позволяют осуществить подробный анализ влияния основных факторов на процесс демпфирования и оценить его эффективность в каждом конкретном случае.

Проведем указанный анализ на базе данных электродвигателя Д-550Ф с медным коллектором для случаев, когда машина работает в номинальном режиме на нижней и верхней границах ОБР.

Расчеты показывают, что при работе с недокоммутацией наблюдается снижение коэффициента демпфирования по мере увеличения щеточного перекрытия до 1,7...1,8, а затем G вновь несколько возрастает (рис. 3, *б*). Это связано с изменением таких параметров, как $i_{2(0)}$ и $r_{н2(0)}$ при изменении величины щеточного перекрытия.

Следовательно, данный аспект наряду с другими (например, влияние $\beta_щ$ на коммутирующую ЭДС) должен учитываться при оптимизации величины щеточного перекрытия. Последующий анализ проводится при $\beta_щ$=1,8.

Как отмечалось в [1], одним из основных факторов, влияющих на эффективность демпфирования, является отношение $M_{12}^2/L_1L_2=k_1 \cdot k_2$.

На рис. 4, *б*, приведены зависимости токов дуги от времени при различных величинах $k_1 \cdot k_2$.

В случае, когда $k_1 \cdot k_2$=0 (M_{12}=0 и эффект демпфирования отсутствует) время горения дуги максимально и составляет $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ с (почти на два порядка меньше расчетного периода коммутации).

При увеличении $k_1 \cdot k_2$ до 0,8 время $t_д$ снижается до $2{,}6 \cdot 10^{-7}$ с, т.е. в 5 раз. Соответственно это сопровождается снижением величины энергии, выделяющейся в СК, что подтверждается зависимостью G от $k_1 \cdot k_2$, представленной на рис. 5. Из диаграммы (рис. 5, *б*) видно, что при увеличении $k_1 \cdot k_2$ от нуля до 0,8 коэффициент G снижается почти в 5,7 раза.

Эффект демпфирования во многом зависит от параметров демпфирующего контура (в предыдущих случаях параметры демпфируемого и демпфирующего контуров были идентичны), поэтому целесообразно оценить влияние, например, числа витков в секции 2 на параметр G. При этом параметры секции 2 будут связаны с параметрами секции 1 (приближенно) следующими зависимостями: $L_2=L_1/k$; $R_{s2}=R_{s1}/(k)^{0,5}$; $e_{к2}=e_{к1}/(k)^{0,5}$.

Из рис. 6, *б*, следует, что при снижении индуктивности L_2 в k раз в сравнении с L_1 происходит некоторое уменьшение G, т.е. эффективность демпфирования на нижней границе ОБР повышается со снижением числа витков в демпфирующем контуре.

Напротив, коммутирующая ЭДС секции 1 на верхней границе ОБР «закачивает» энергию в коммутируемый контур, что увеличивает длительность горения дуги и количество энергии, выделившейся в СК. При этом оно может быть больше, чем количество электромагнитной энергии коммутируемого контура в момент начала искрового разряда, о чем свидетельствуют значения G при малых величинах $k_1 \cdot k_2$ (рис. 5, *а*).

Время горения дуги на верхней границе ОБР снижается с повышением $U_д$ (рис. 7, *а*), оставаясь выше соответствующих значений $t_д$ на нижней границе ОБР (рис. 1).

Характер изменения коэффициента демпфирования от $U_д$ на верхней границе ОБР (рис. 7, *б*) так-

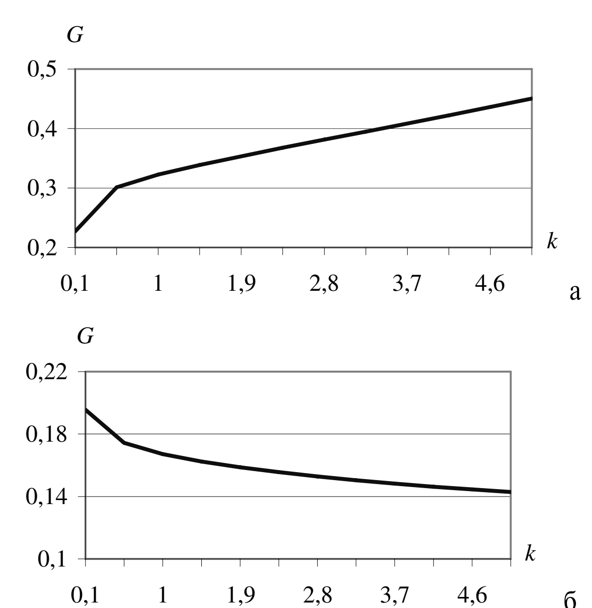


Рис. 6. *Зависимость коэффициента демпфирования от числа витков в демпфирующем контуре на границе ОБР: а) верхней; б) нижней*

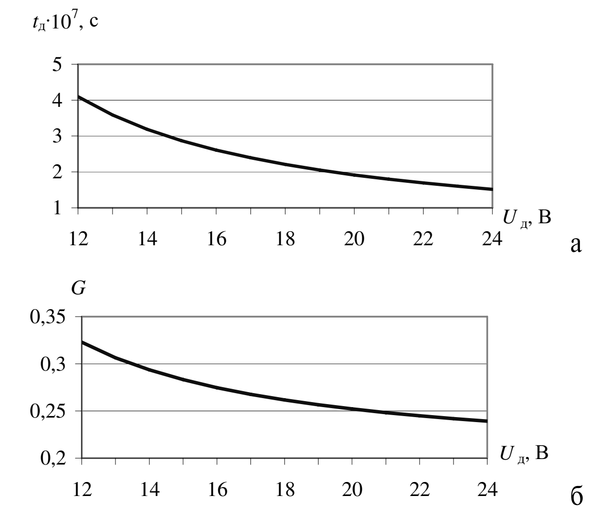


Рис. 7. *Зависимость от напряжения горения дуги на верхней границе ОБР: а) времени горения дуги; б) коэффициента демпфирования*

же противоположен поведению G на нижней границе ОБР в аналогичных условиях (рис. 2).

Выводы

1. Общим явлением при работе электрической машины на верхней и нижней границах ОБР является снижение энергии искрового разряда при увеличении взаимной магнитной связи между коммутируемыми секциями. Влияние ряда других параметров, таких как $\beta_щ$, $e_{к1}$, $e_{к2}$, k в большинстве случаев противоположно на верхней и нижней границах ОБР, и их величины следует выбирать, исходя из достижения наилучших показателей того или иного параметра оптимизации, учитывая, что рассматриваемые параметры оказывают воздействие на ход коммутационного процесса и до момента возникновения искрового разряда.
2. Выражения, полученные для расчета $i_д$, $t_д$, $W_д$, G, позволяют достаточно точно прогнозировать эффективность процесса демпфирования коммутируемых секций на стадии возникновения искровых разрядов под щеткой и осуществлять подбор параметров обмоток якоря, обеспечивающих повышение их коммутирующих свойств и, как следствие, снижение выделения энергии коммутационного искрения под щеткой.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом № 02.442.11.7107 от 26.10.2005 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров В.Е. Исследование влияния демпфирования на параметры коммутируемых секций крупных машин постоянного тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1975. – 19 с.
2. Качин С.И., Боровиков Ю.С., Качин О.С., Клыжко Е.Н. Коммутирующие свойства обмоток якорей коллекторных машин электроприводов на начальном этапе коммутации // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 136–140.
3. Качин С.И. Улучшение эксплуатационных характеристик коллекторных машин малой мощности // Электричество. – 1997. – № 6. – С. 28–32.